

# Энергетические характеристики излучения лазера KULON-10Cu-UV

В.М.Батенин, В.Т.Карпухин, Н.М.Лепёхин, Н.А.Лябин, М.М.Маликов, Ю.С.Присеко, В.Г.Филиппов, А.Д.Чурсин

*Исследованы энергетические характеристики излучения промышленного лазера на парах меди серии KULON с нелинейным преобразователем частоты на кристаллах DKDP и BBO. В режиме высокоскоростной импульсной модуляции лазерного излучения, применяемой в лазерах данной серии, измерены средние и пиковые мощности, а также энергии и длительности импульсов излучения на длинах волн 510, 578, 255, 271 и 289 нм. Максимальная средняя мощность излучения на длине волны 271 нм составила 420 мВт (DKDP), на длинах волн 255 и 289 нм – 350 и 110 мВт соответственно (BBO). Экспериментально показана возможность оперативного управления средними энергетическими характеристиками УФ излучения за счёт регулирования частоты следования импульсов генерации лазера.*

**Ключевые слова:** лазер на парах меди, нелинейное преобразование частоты излучения, ультрафиолетовое излучение, энергетические характеристики, управление мощностью.

## 1. Введение

Лазеры на парах меди (ЛПМ) с нелинейным преобразователем частоты излучения имеют увеличенный по сравнению с обычными ЛПМ диапазон длин волн генерации, что существенно расширяет область их применения. Классические ЛПМ, генерирующие на длинах волн 510 и 578 нм, с успехом используются в прецизионной микрообработке различных материалов, в медицине и различных технологиях [1]. Поскольку видимое излучение ЛПМ слабо поглощается в воде и ряде других жидкостей, они применяются для образования наночастиц при лазерной абляции твердых тел в этих средах [2]. ЛПМ, работающие в УФ диапазоне длин волн, могут представлять интерес для лазерной абляции материалов в вакууме или газе. Анализ показывает, что ЛПМ с преобразованием частоты излучения на нелинейных кристаллах обладают рядом преимуществ перед другими источниками лазерного УФ излучения. Например, по сравнению с эксимерными лазерами они имеют более высокую частоту следования импульсов генерации (12–15 кГц), большую длину когерентности (единицы – десятки сантиметров) и малую расходимость излучения (около 0.2 мрад), а также больший срок службы и меньшую стоимость. По сравнению с твердотельными лазерами расходимость у таких лазеров меньше, а средняя пиковая мощность излучения больше, чем, например, у газоразрядных аргонных лазеров.

Разработаны и сертифицированы промышленные ЛПМ серии KULON [3] с каналом высокоскоростной импульс-

ной модуляции [4]. Суть способа высокоскоростной импульсной модуляции заключается в изменении условий генерации за счет регулирования населённости нижних (метастабильных) лазерных уровней с помощью дополнительного импульса возбуждения, энергии которого достаточно для их заселения и недостаточно для заселения верхних (резонансных) уровней. При этом путём изменения времени появления дополнительного импульса относительно основного импульса возбуждения достигается режим генерации (при отставании дополнительного импульса возбуждения от основного) или режим гашения излучения лазера (в случае, когда дополнительный импульс опережает основной). Данный способ управления детально исследован в экспериментальной работе [5]. Он позволяет дозировать излучение ЛПМ с точностью до одного импульса по любому наперёд заданному закону, изменять частоту следования импульсов генерации  $f_p$ , осуществлять моноимпульсный режим работы, создавать любую последовательность импульсов генерации. Отметим, что при этом возбуждение активной среды ЛПМ остаётся неизменным, т.е. импульсная накачка лазера осуществляется с номинальными частотой и энерговкладом. Это позволяет поддерживать постоянство параметров каждого импульса излучения (энергию, пиковую мощность, расходимость) независимо от частоты их следования  $f_p$ .

На базе такого промышленного ЛПМ и нелинейного преобразователя частоты излучения на кристаллах DKDP и BBO был разработан лазер KULON-10Cu-UV, генерирующий излучение в видимом и УФ диапазонах. Ниже дано его описание и представлены результаты измерений энергетических характеристик выходного излучения.

## 2. Оптическая схема лазера и его функциональные возможности

Оптическая схема лазера (рис.1) состоит из оптического неустойчивого резонатора (НР) с поляризатором излучения, оптической схемы формирования геометрии

В.М.Батенин, В.Т.Карпухин, М.М.Маликов. Объединённый институт высоких температур РАН, Россия, 125412 Москва, ул. Ижорская, 13/19; e-mail: mmalikov@oivtran.iitp.ru

Н.М.Лепёхин, Ю.С.Присеко, В.Г.Филиппов. ООО «Опытно-экспериментальное производство Всероссийского электротехнического института», Россия, Московская обл., 143500 Истра, а/я 33; e-mail: info@schema5.ru

Н.А.Лябин, А.Д.Чурсин. ФГУП «Научно-производственное предприятие "Исток"», Россия, Московская обл., 141190 Фрязино, ул. Вокзальная, 2А

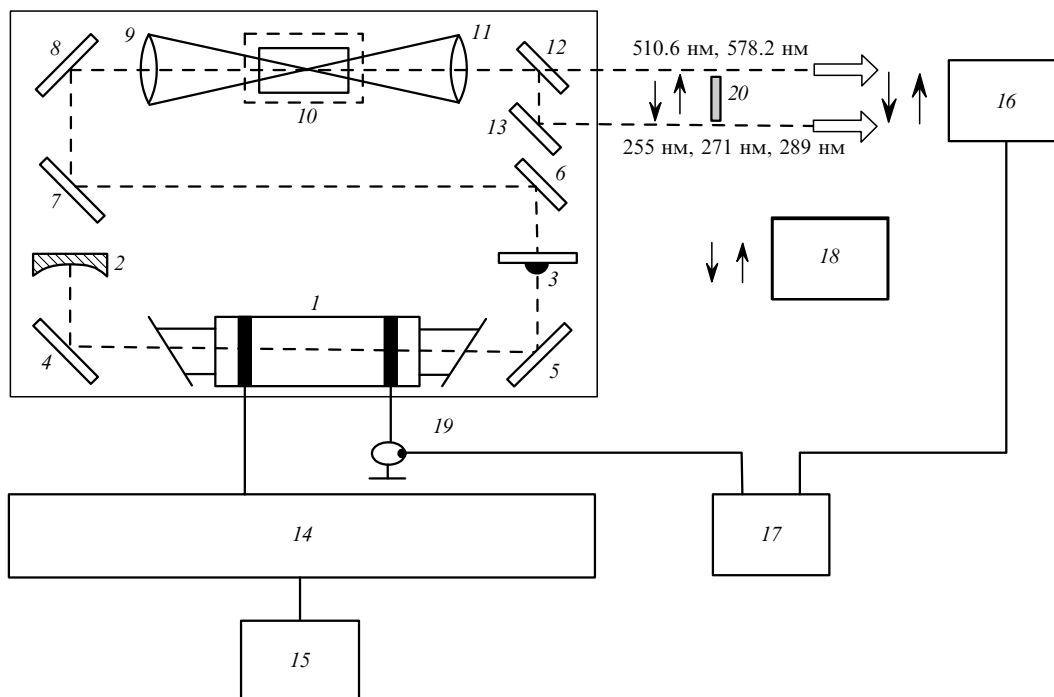


Рис. 1. Оптическая схема лазера KULON-10Cu-UV.

луча (СФГЛ) в нелинейном кристалле и оптической схемы разводки лучей (РЛ) разного диапазона длин волн и формирования их геометрии на выходе лазера.

Лазерный излучатель 1 (активный элемент LT-10Cu) расположен в НР, образованном глухим вогнутым зеркалом 2, выпуклым зеркалом 3, поляризационной пластиной 4 со специальным отражающим покрытием, а также поворотным зеркалом 5. Радиус кривизны зеркала 2 составлял  $\sim 2000$  мм, а зеркала 3 – около 10 и 100 мм, что соответствовало двум значениям коэффициента увеличения резонатора М, равным  $\sim 200$  и  $\sim 20$ . Диаметр луча на выходе резонатора равнялся 14 мм.

СФГЛ состоит из поворотных плоских зеркал 6–8 и ахроматического просветлённого объектива 9, который фокусирует лазерное излучение в нелинейный кристалл 10, установленный внутри термостата. Использовался кристалл DKDP длиной 40 мм и диаметром 10 мм с углом среза, соответствующим генерации суммарной частоты (ГСЧ) жёлтой и зелёной линий ЛПМ (длина волны  $\lambda = 271$  нм), а также кристалл ВВО длиной 7 мм с поперечным сечением  $7 \times 6$  мм и углом среза  $48^\circ$ . На этом кристалле, кроме ГСЧ, можно было осуществлять ГВГ жёлтой и зелёной линий излучения ЛПМ (гармоники с  $\lambda = 255$  и 289 нм) путём угловой перестройки кристалла в пределах  $\sim 10^\circ$  с помощью микрометрического поворотного столика. Фокусное расстояние объектива 9 было оптимизировано в работах [6, 7] под нелинейный кристалл DKDP при схожих параметрах лазерного излучения и составляло 500 мм. При использовании кристалла ВВО оптимизации не проводилось.

Схема РЛ состоит из линзы 11 и дихроичных плоских зеркал 12, 13 с коэффициентом пропускания  $\sim 97\%$  на длинах волн 510 и 578 нм и коэффициентом отражения  $0.97\% - 0.99\%$  на длинах волн УФ диапазона. Поворотное зеркало 13 обеспечивает выход УФ излучения, а остаточное видимое излучение ЛПМ выходит через зеркало 12. Диаметры пучков на выходе равны  $\sim 4$  мм, поля-

ризация электрического вектора видимого излучения является вертикальной, а в УФ диапазоне – горизонтальной.

Работа лазерного излучателя 1 в режиме высокоскоростной импульсной модуляции осуществлялась от блока питания 14, выполненного в соответствии с [3, 4] и управляемого от персонального компьютера 15. В данных экспериментах электрическая мощность, отбираемая от блока питания 14, в цепи постоянного тока составляла  $\sim 2.0$  кВт. Номинальная частота следования импульсов накачки активной среды ЛПМ была постоянной и равнялась 12.5 кГц. Рабочая частота следования импульсов излучения  $f_p$  варьировалась от 12.5 до  $\sim 2.85$  кГц.

Форма импульсов излучения лазера регистрировалась фотоприёмником 16 (ФЭК-22СПУ-М) и осциллографом 17 (Tektronix TDS3054B). Средняя по частоте следования импульсов мощность излучения измерялась термоэлектрическим преобразователем 18 (NOVA-II). Импульсы тока накачки лазера и частота их следования регистрировались осциллографом 17 с помощью пояса Роговского 19. Энергия импульсов излучения определялась как отношение средней мощности к частоте следования импульсов лазера. Мощность импульса излучения определялась по осциллограммам при использовании измеренных значений энергии этих импульсов. Измерения проводились в условиях установившегося температурного режима. Для измерения средней мощности и регистрации формы импульсов излучения лазера на различных длинах волн устанавливались фильтры 20 (СЗС20 для зелёной линии, ОС11 для жёлтой и стекло БС2 для отсечки УФ линий). Суммарная по длинам волн (510.6 нм и 578.2 нм) средняя мощность излучения  $W_{g+y}$  на выходе из резонатора лазера измерялась за зеркалом 6. На выходе всей лазерной системы, за зеркалом 12, регистрировалась остаточная средняя мощность (суммарная по длинам волн)  $W_{g+y}^*$ . В тех же точках оптического тракта измерялись средние мощности на отдельных линиях из-

лучения:  $W_g$  – на зелёной,  $W_y$  – на жёлтой. Средняя мощность УФ излучения  $W_{UV}$  на одной из линий (255, 271 или 289 нм) измерялась за зеркалом 13. Аналогично располагались и фотоприемники для регистрации осциллограмм импульсов излучения в видимом ( $U$ ) и УФ ( $U_{UV}$ ) диапазонах длин волн.

При использовании в лазере KULON-10Cu-UV кристалла DKDP осуществляется режим работы с одновременной генерацией излучения на длинах волн 510.6, 578.2 и 271 нм. С нелинейным кристаллом BBO дополнительно к основным линиям излучения ЛПМ генерируется одна из следующих линий: 271, 255 или 289 нм. Кроме того, в последнем случае возможна оперативная перестройка с одной длины волны УФ диапазона на другую.

### 3. Результаты экспериментов и их обсуждение

В экспериментах максимальная средняя мощность излучения ЛПМ на выходе из резонатора  $W_{g+y}$  составляла  $\sim 10$  Вт, а отношение мощностей  $W_g/W_y$  было равно 0.74 – 0.8 при частоте следования импульсов излучения, равной номинальному значению  $f_p = 12.5$  кГц.

Известно [6, 7], что эффективность нелинейного преобразования частоты излучения ЛПМ определяется в основном пиковой плотностью мощности падающего на

кристалл излучения, его расходимостью и долей энергии, сосредоточенной в слабо расходящейся компоненте лазерного пучка. Эта доля энергии, в свою очередь, существенно зависит от коэффициента увеличения резонатора  $M$ . При  $M \geq 100$  возможно формирование компоненты пучка с расходимостью, близкой к дифракционной [8], но при этом доля энергии в дифракционном пучке мала и для ЛПМ серии KULON не превышает 25 % [3].

Для иллюстрации влияния коэффициента увеличения на параметры лазера KULON-10Cu-UV эксперименты были выполнены при разных значениях  $M$ . На рис.2 представлены импульсы излучения лазера на выходе из резонатора при  $M = 200$  и 20. Видно, что максимальные пиковые мощности импульсов излучения в обоих случаях примерно одинаковы ( $\sim 80$  кВт), но при  $M = 200$  амплитуда третьего пика (третьего резонаторного пучка) (65 кВт) больше соответствующей амплитуды (38 кВт) при  $M = 20$ . Это свидетельствует о снижении доли энергии в слабо расходящихся компонентах выходного пучка лазерного пучка при уменьшении значения  $M$ . Отметим, что в данном эксперименте величина  $W_{g+y}$  на выходе из резонатора практически не зависела от  $M$ .

На рис.3 показано изменение средних мощностей УФ излучения  $W_{UV}$  на выходе лазера KULON-10Cu-UV при использовании кристаллов DKDP и BBO в зависимости от рабочей частоты следования импульсов  $f_p$ . Практиче-

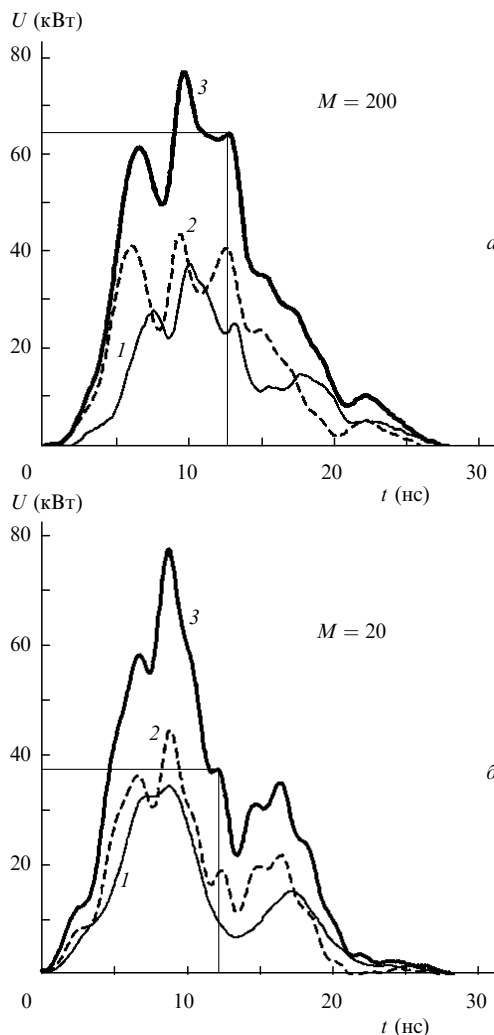


Рис.2. Импульсы излучения на выходе резонатора ЛПМ при  $M = 200$  (а) и 20 (б); 1 –  $\lambda = 578$  нм, 2 –  $\lambda = 510$  нм, 3 –  $\lambda = 510$  и 578 нм.

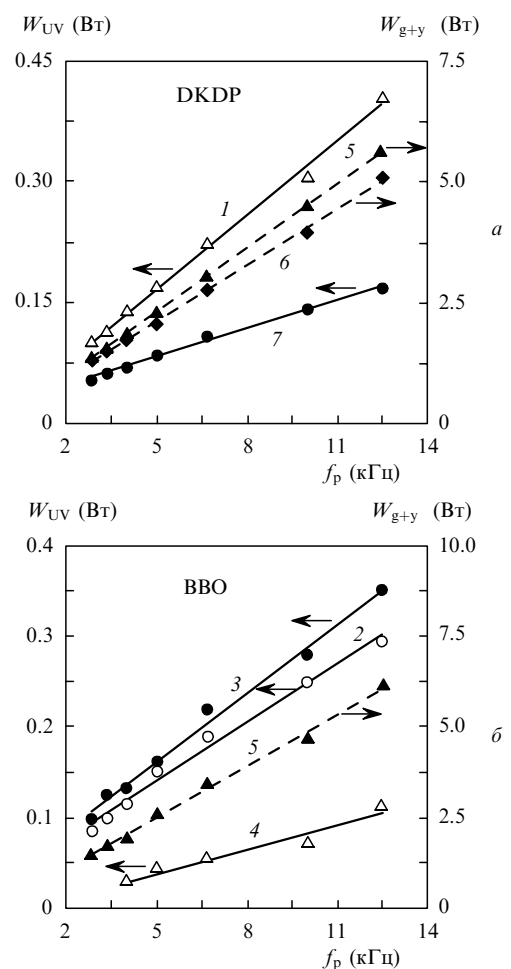


Рис.3. Зависимости средней мощности УФ излучения лазера от коэффициента увеличения резонатора и рабочей частоты следования импульсов при  $M = 200$  (1–5) и 20 (6,7); 1,2,7 –  $\lambda = 271$  нм, 3 –  $\lambda = 255$  нм, 4 –  $\lambda = 289$  нм, 5,6 – суммарно по длинам волн 510 и 578 нм.

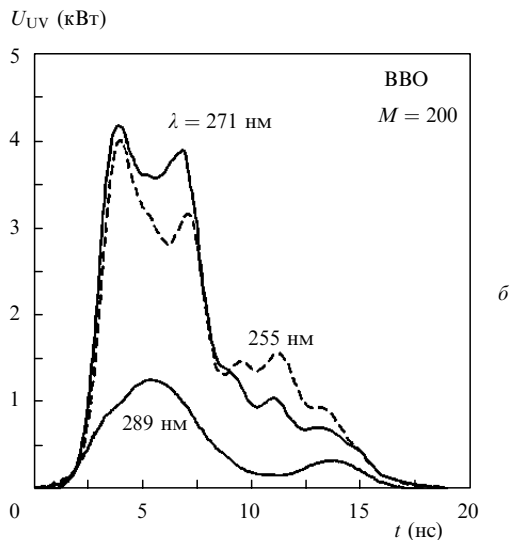
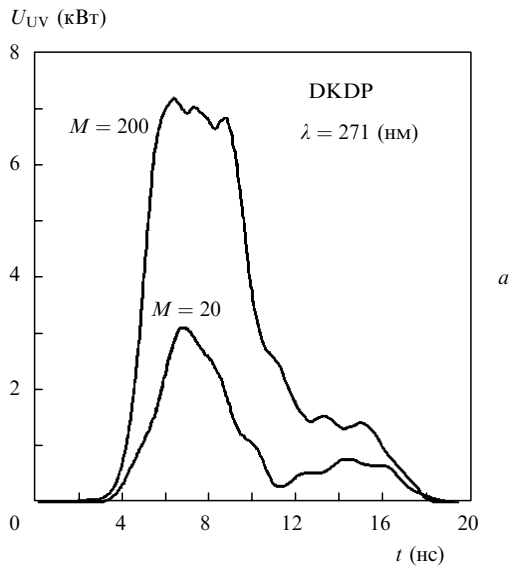


Рис.4. Импульсы УФ излучения лазера при  $M = 20$  и  $200$  ( $\lambda = 271$  нм, DKDP) (а) и при  $M = 200$  ( $\lambda = 271, 255$  и  $289$  нм, BVO) (б).

ски линейные зависимости средних мощностей свидетельствуют о неизменности параметров импульсов желтой и зелёной линий ЛПМ на входе в кристалл и соответственно импульсов излучения в УФ диапазоне, а также о постоянстве эффективности нелинейного преобразования при варьировании  $f_p$ . Очевидно (рис.3,а) влияние коэффициента  $M$  на мощность УФ излучения. Величина  $W_{UV}$  на длине волны 271 нм при  $M = 200$  почти вдвое больше, чем при  $M = 20$ , а остаточная мощность лазера  $W_{g+y}^*$  при  $M = 200$ , наоборот, меньше, чем при  $M = 20$ , на 10%. Последнее связано с тем, что при  $M = 20$  доля энергии, приходящейся на компоненту сверхсветимости в пучке, больше, чем при  $M = 200$ . Поскольку из-за огромной расходимости этой компоненты значительная часть её не проходит через апертуру кристалла, при  $M = 20$  кристалл пропускает меньше энергии, чем при  $M = 200$ .

На рис.4,а представлены осциллограммы импульсов УФ излучения  $U_{UV}$  лазера KULON-10Cu-UV на длине волны 271 нм (кристалл DKDP) при двух значениях  $M$  и номинальной рабочей частоте  $f_p = 12.5$  кГц. Уменьшение величины  $M$  от 200 до 20 приводит к падению пиковой мощности импульса УФ излучения примерно в два

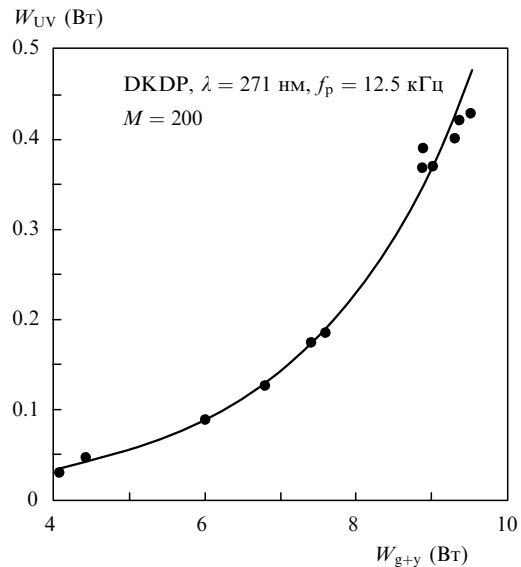


Рис.5. Зависимость средней мощности УФ излучения ( $\lambda = 271$  нм, DKDP) от  $W_{g+y}$  при  $M = 200$  и  $f_p = 12.5$  кГц.

раза, что хорошо согласуется с влиянием величины  $M$  на среднюю мощность УФ излучения (см. рис.3,а). Импульсы  $U_{UV}$  на длинах волн 289, 271 и 255 нм (кристалл BVO) при той же частоте следования импульсов  $f_p$  и  $M = 200$  представлены на рис.4,б. Наилучший результат получен на длинах волн 271 и 255 нм (ГСЧ и ГВГ зелёной линии).

Все описанные выше эксперименты проводились при постоянном режиме накачки ЛПМ, когда энерговыход в активную среду не менялся, а варьирование средней мощности излучения достигалось методом высокоскоростной импульсной модуляции. Влияние импульсного энерговыхода на среднюю мощность УФ излучения продемонстрировано на кристалле DKDP ( $\lambda = 271$  нм) при постоянной частоте возбуждения ЛПМ 12.5 кГц. Зависимость  $W_{UV}$  от  $W_{g+y}$ , представленная на рис.5, имеет нелинейный характер. Это связано с тем, что при варьировании величины  $W_{g+y}$  вследствие изменения импульсного энерговыхода изменялись также пиковая мощность излучения ЛПМ и соотношение энергий импульсов излучения жёлтой и зелёной линий, что существенно влияло на эффективность генерации УФ излучения. Видно, кроме того, что наибольшая мощность УФ излучения достигалась при максимальной средней мощности излучения на выходе резонатора.

Эффективность нелинейного преобразования  $\eta$  частоты излучения в кристаллах определялась как отношение  $W_{UV}/\alpha W$ . Здесь  $W$  равно  $W_{g+y}$  при  $\lambda = 271$  нм,  $W_g$  при  $\lambda = 255$  нм и  $W_y$  при  $\lambda = 289$  нм;  $W_{UV}$  равно средней мощности излучения на соответствующей длине волны;  $\alpha$  – коэффициент пересчёта мощности лазера на выходе из резонатора к мощности на входе в кристалл, учитывающий потери в оптическом тракте и равный  $\sim 0.9$  при  $M = 200$  и  $\sim 0.8$  при  $M = 20$ . Вычислялся также коэффициент использования мощности ЛПМ при генерации УФ излучения в принятой оптической схеме лазера KULON-10Cu-UV:  $\eta_{UV} = W_{UV}/W_{g+y}$ .

Полученные в настоящей работе энергетические характеристики излучения лазера KULON-10Cu-UV и эффективности генерации УФ излучения представлены в табл.1.

Табл.1.

Кри- сталл	$\lambda$ (нм)	$M$	$W_{UV}$ (мВт)	$U_{UV}$ (кВт)	$*E$ (мкДж)	$\eta$ (%)	$\eta_{UV}$ (%)	
DKDP	271	200	420	7.3	34	4.9	4.4	
		20	200	3.1	16	2.9	2.3	
ВВО	271		330	4.3	26	3.8	3.5	
		255	200	350	4.4	28	7.1	3.7
		289		110	1.3	9	3.0	1.2

\* $E$  – энергия импульса излучения.

#### 4. Заключение

Экспериментальные исследования параметров опытного образца промышленного лазера KULON-10Cu-UV показали, что при использовании ЛПМ с уровнем выходной мощности, не превышающим десяти ватт, возможно достижение средней мощности УФ излучения не менее  $\sim 0.4$  Вт и эффективности нелинейного преобразования 3%–7%, что приемлемо для практического применения.

Показано, что импульсная мощность излучения лазера на входе в нелинейный кристалл, импульсная мощность УФ излучения и эффективность нелинейного преобразования не изменяются при изменении рабочей частоты генерируемых импульсов. Таким образом, режим вы-

сокоскоростной импульсной модуляции, применяемый в ЛПМ серии KULON, позволяет управлять средней мощностью УФ излучения, что очень важно для технологических применений.

Дальнейшее повышение энергетических параметров ультрафиолетового излучения потребует увеличения пиковой мощности и стабильности импульсов исходного излучения ЛПМ, доли энергии в слабо расходящихся компонентах лазерного пучка и оптимизации нелинейного преобразователя.

1. Григорьянц А.Г., Казарян М.А., Лябин Н.А. *Лазеры на парах меди: конструкция, характеристики и применения* (М.: Физматлит, 2005).
2. Бозон-Вердюра Ф., Байнер Р., Воронов В.В. и др. *Квантовая электроника*, **33** (8), 714 (2003).
3. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. и др. *Прикладная физика*, № 1, 110 (2005).
4. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г. *Прикладная физика*, № 1, 8 (2006).
5. Лепехин Н.М., Присеко Ю.С., Филиппов В.Г., Карпухин В.Т. и др. *Квантовая электроника*, **37** (8), 765 (2007).
6. Карпухин В.Т., Конев Ю.Б., Маликов М.М. *Квантовая электроника*, **25** (9), 809 (1998).
7. Карпухин В.Т., Маликов М.М. *ЖТФ*, **70** (4), 87 (2000).
8. Исаев А.А., Казарян М.А., Петраш Г.Г. и др. *Квантовая электроника*, **4**, 1325 (1977).